

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕРТОРОВ И ДВУХКАСКАДНЫХ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО – НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

*В. А. Лыков, Е. С. Бакуркина, Д. Н. Боков, Д. В. Дембовский, Н. Г. Карлыханов,
Г. Н. Рыкованов, Л. В. Соколов, А. А. Сырцов, А. Н. Шушлебин*

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Несомненным успехом исследований в области ИТС, проводимых в последние годы, является достижение условий термоядерного зажигания с положительным выходом энергии в опытах с мишенями непрямого облучения на лазерной установке NIF [1]. В отличие от NIF строящаяся в России мощная лазерная установка [2] будет работать на 2-ой, а не на 3-ей гармонике излучения Nd-лазера и иметь мишенную камеру, более приспособленную для сферически симметричного облучения мишеней. Трудности в обеспечении условий термоядерного зажигания мишеней как прямого [3], так и непрямого облучения [4] для проектных параметров Российской мегаджоульной лазерной установки стимулирует поиск альтернативных путей достижения этой цели.

В докладе [5] представлены результаты расчетов поля теплового рентгеновского излучения внутри сферического бокса с круговыми конверторами, нагреваемыми снаружи лазерными пучками мегаджоульной установки. Конверторы, симметрично врезанные в стенки бокса, представляют собой диски из фольги или малоплотного материала (пены) с высоким значением атомного номера Z , которые полупрозрачны для собственного теплового излучения. В центре системы помещается сферическая мишень, которая должна облучаться достаточно однородно тепловым излучением с внутренних поверхностей конверторов и стенок бокса. Основное преимущество новой конструкции бокса с конверторами это – отсутствие проблем, связанных с запуском лазерного излучения внутрь бокса через отверстия, которые существуют в традиционных схемах [1, 4]. По существу предложен новый вариант схемы прямого-непрямого облучения мишеней ИТС. Термин «direct-indirect» впервые введен в работе [6], где предложено сферическую мишень окружать с вакуумным зазором тонкой оболочкой из золотой фольги, облучаемой снаружи лазерным излучением с интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^{15}$ Вт/см² и длиной волны $\lambda = 0,35$ мкм. Расчеты и эксперименты указывают, что эффективность преобразования энергии лазерного излучения в односторонний поток теплового излучения с тыльной стороны конвертора может достигать $\nu_- \approx 30\text{--}40\%$ [6]. Отметим, что в качестве конвертора-поглотителя предложено также использовать малоплотные композиционные материалы [7]. Поскольку в новой конструкции бокса эффективность ν_- в ~ 2 раза ниже, чем в классической схеме цилиндрического бокса с двумя отверстиями [1], то и достижимая в боксе температура излучения $T_{\text{изл}}$ будет на величину $\sim 15\%$ ниже. Согласно [5] при мощности лазерного излучения $P_L \approx 450$ ТВт в боксе новой конструкции может быть достигнута температура излучения $T_{\text{изл}} \approx 0,26\text{--}0,28$ кэВ, что подтверждается расчетами, проведенными по двумерной программе радиационной газовой динамики [8]. По-видимому, новая конструкция бокса наиболее пригодна для изучения сжатия и зажигания двухкаскадных мишеней, что возможно при таких значениях температур излучения [9].

В докладе представлены результаты оптимизации параметров конверторов для прямого-непрямого облучения мишеней ИТС, выполненной с использованием 1D- и 2D- программ радиационной газовой динамики, разработанными в РФЯЦ – ВНИИТФ. В этих расчетах использовались табличные УРС и пробеги излучения, рассчитанные по программе RESEOS [10]. Обсуждаются также результаты расчетов двухкаскадных мишеней, выполненных для схемы прямого-непрямого облучения и проектных параметров Российской мегаджоульной лазерной установки. Рассмотрены вопросы снижения запасов по зажиганию таких мишеней при учете турбулентного перемешивания в расчетах с использованием $k\epsilon$ -моделей, предложенных в [11, 12]. Запасы по зажиганию двухкаскадных мишеней, полученные в этих расчетах, сравниваются с результатами расчетов, выполненных в РФЯЦ – ВНИИТФ для условий экспериментов [1], проведенных на установке NIF с положительным выходом энергии.

Литература

1. **Kritcher, A. L.** Design of first experiment to achieve fusion target gain >1 [Text] / A. L. Kritcher, et al. // Phys. Plasmas. – 2024. – Vol. 31. – P. 070502.

2. **Гнутов, А. С.** Мощные лазеры для исследований в области физики высокой плотности энергии [Текст] / А. С. Гнутов, С. А. Бельков // Доклад на XVI Международной конференции «Забабахинские научные чтения». – 2023. www.vniitf.ru.
 3. **Бакуркина, Е. С.** Расчеты мишеней прямого облучения для мегаджоульных установок с излучением во 2-ой и 3-ей гармониках Nd-лазера [Текст] / Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков и др. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 271–284.
 4. **Бондаренко, С. В.** Результаты трехмерных расчетов конверсии лазерного излучения в рентгеновское в сферическом боксе для условий мегаджоульной лазерной установки [Текст] / С. В. Бондаренко, Е. И. Митрофанов, Л. Ф. Потапкина, О. О. Шаров // ВАНТ. Сер. «Мат. мод. физ. проц». – 2020. – Вып. 3. – С. 11–22.
 5. **Химич, И. А.** Трехмерные аналитические расчеты поля теплового излучения внутри сферического бокса с круговыми конверторами, нагреваемыми снаружи лазерными пучками мегаджоульной установки [Текст] / И. А. Химич, В. А. Лыков, Г. Н. Рыкованов // XVII Международная конференция «Забабахинские научные чтения» : тез. докл. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2025.
 6. **Eliezer, S.** Direct-indirect drive, a new possibility for laser induced fusion [Text] / S. Eliezer, J. J. Honrubia and G. Velarde // Phys. Lett. A. – 1992. – Vol. 166. – P. 249–252.
 7. **Гуськов, С. Ю.** Малоплотный поглотитель-конвертор в лазерных термоядерных мишенях прямого облучения [Текст] / С. Ю. Гуськов, Ю. А. Меркульев // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 4. – С. 311–317.
 8. **Чубарешко, И. С.** Результаты численного моделирования переноса рентгеновского излучения в сферическом боксе-конверторе по программе ТИГР [Текст] / И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков, В. А. Лыков // XVII Международная конференция «Забабахинские научные чтения» : тез. докл. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2025.
 9. **Лыков, В. А.** Оптимизация двухоболочечных мишеней для проведения экспериментов вблизи порога термоядерного зажигания на мегаджоульной лазерной установке [Текст] / В. А. Лыков, Е. С. Андреев, Л. И. Ардашева и др. // Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров : РФЯЦ – ВНИИТФ, – 2017. – Т. 2. – С. 123–129.
 10. **Ovechkin, A. A.** RESEOS – a model of thermodynamic and optical properties of hot and warm dense matter [Text] / A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, V. G. Novikov, et al. // HEDP. – 2014. – Vol. 13. – P. 20–33.
 11. **Неуважаев, В. Е.** Математическое моделирование турбулентного перемешивания [Текст]. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2007.
 12. **Авраменко, М. И.** О $k\varepsilon$ -модели турбулентного перемешивания [Текст]. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010.
-